



OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DA TRELIÇA PLANA EM ARCO DO TIPO PRATT

Gislaine Goulart Tavares (1), Márcio Vito (2);

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) gislaine-goulart@hotmail.com, (2) marciovito@unesc.net

RESUMO

A estrutura em aço está em evidência no mercado por atender aos requisitos atuais voltados a sustentabilidade e inovação, é um material reciclável que quando utilizado de forma adequada, em conjunto a estudos de otimização traz redução do consumo de matéria prima utilizada na concepção da estrutura e conseqüentemente a racionalização do sistema estrutural. Este estudo contemplou a otimização geométrica aplicada a treliça em arco, submetida a carregamento vertical uniforme no banzo superior da tipologia Pratt. Para o desenvolvimento deste adotou-se um modelo de referência (REF) usualmente utilizado por uma empresa localizada na cidade de Itajaí/SC com especialidade na área, a partir de então realizou-se estudos modificando os três fatores geométricos que influenciam diretamente no consumo de aço, são eles: relação altura do arco e comprimento da treliça (H/L), distância entre montantes (U) e distância entre bantos (D). Após este processo foram selecionados os modelos com destaque em economia de cada grupo e combinados entre si, gerando 18 novos modelos. Dentro destes novos modelos obteve-se como mais econômico o modelo PRATT 02, com uma redução quando comparado ao modelo referência de 81,63% em consumo de aço. Por fim realizou-se uma comparação entre tipologias, comparou-se a tipologia Pratt com a Warren no qual encontrou-se uma redução de 9,21% no consumo de aço do modelo PRATT 02 comparado à tipologia Warren.

Palavras-Chave: otimização, redução do consumo, tipologia Pratt.

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade do mercado em desenvolver métodos que visam racionalização da construção civil e a sustentabilidade aplicada as obras e projetos, uma opção é a estrutura em aço. Por ser construção com processos de projeto, fabricação e montagem, fornecem maior qualidade de produção, agilidade na execução, estruturas mais resistentes e redução na geração de resíduos.

Por vezes, o custo de uma obra de engenharia em aço pode se sobressair caso não seja realizado um estudo detalhado para cada tipo de projeto. A variação do custo eventualmente se deve ao fato de haver muitas opções topológicas.

“A grande diversidade de modelos topológicos disponíveis, aliada a falta de informação sobre o comportamento destas topologias em serviço, aumenta as chances de o profissional adotar modelos impróprios para as solicitações exigidas, muitas vezes projetando estruturas inviáveis economicamente e com eficiência estrutural prejudicada.” (BREUNING, 2008, p.16)

O momento da escolha do modelo estrutural que será adotado é essencial para o sucesso econômico e agilidade na concepção da obra, pois a escolha influencia diretamente no consumo de matéria prima, mão de obra e tempo de execução, fatores diferenciais para a competitividade de uma empresa no cenário da construção civil.

O projetista da estrutura de aço deve deter amplo conhecimento das particularidades de cada sistema e saber qual a influência no processo construtivo da tipologia adotada. Cunha & Barbosa (2013) mencionaram que há diversos sistemas estruturais, contudo, a treliça plana é um dos sistemas mais utilizados por ser um modelo estrutural constituído basicamente por barras unidas pela extremidade formando os nós articulados. Como os esforços são aplicados diretamente nos nós, os únicos esforços atuantes nas barras são os de tração e compressão, sendo assim madeira e aço são os materiais comumente adotados para compor este sistema pois suportam bem estes tipos de esforços, conforme apontou Sussekind (1983).

O modelo da treliça deve ser escolhido com base na necessidade do projeto. Deve-se atentar a compatibilização de acordo com os tipos de solicitações em cada ponto da treliça, desenvolvendo assim modelos únicos para cada projeto. Segundo Pereira (2007), nos dias atuais é muito comum utilizar estruturas treliçadas em projetos de grandes construções. Estas estruturas são bastantes utilizadas em situações onde deseja-se obter uma estrutura leve, mas com elevada resistência. É comumente utilizada também como cobertura de galpões, casas, edifícios e ginásios.

No contexto da construção metálica brasileira, os galpões de uso geral são responsáveis por uma grande parcela dos empreendimentos. Dentro deste importante seguimento, as estruturas de um só pavimento são as mais utilizadas, exigindo soluções econômicas e versáteis para uma larga faixa de vãos e uma ampla gama de aplicações, tais como: fabricas, depósitos, lojas, academias, ginásios poliesportivos, garagens, granjas, hangares, etc. (NOGUEIRA, 2009, p.2) ”.

Entretanto com a necessidade de agilização na confecção dos projetos, a escolha da forma em que será disposta as barras na treliça será feito, conforme Cunha &

Barbosa (2013) pelo engenheiro projetista baseado em sua habilidade, experiência e intuição, contudo esse processo nem sempre é o mais satisfatório com relação à economia. Azevedo (2002) aponta como solução a otimização das estruturas treliçadas a fim de encontrar a partir da otimização modelos que possuam um consumo de aço menor, porém que suportem as mesmas solicitações. A otimização pode ocorrer de três formas: otimização das seções transversais, otimização de forma e otimização de topologia.

O desenvolvimento deste estudo teve como objetivo a otimização da topológica, alterando o modo da distribuição das barras e os perfis utilizados, além disto como complementação a este estudo, o modelo com maior economia da tipologia Pratt foi comparado ao modelo mais econômico da tipologia Warren sugerido por Caetano (2015).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

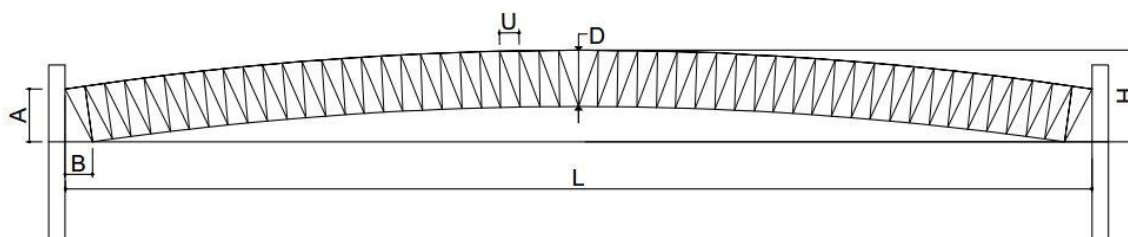
2.1 MODELO REFERÊNCIA

Para o desenvolvimento deste, uma empresa especializada em projeto e fabricação de treliças planas em arco localizada na cidade de Itajaí/SC forneceu o modelo geométrico adotado por eles que atendesse aos mesmos requisitos elencados no decorrer deste.

Os requisitos enviados a empresa para que atendesse as necessidades deste estudo foram referentes a tipologia Pratt, aplicação de carga distribuída no banzo superior equivalente à 7,5 kN/m, vão de 30 metros, utilização de apoios rotulados e adoção de um par de tirantes impedindo as reações horizontais nos pilares.

A geometria da treliça referência fornecida pela empresa e adotada neste estudo teve como características a relação H/L de 0,093, a distância entre os montantes (U) de 0,60 m e distância entre os banzos (D) de 1,70 m. O perfil adotado foi o mesmo para todas as barras da treliça. Para melhor entendimento confeccionou-se o desenho ilustrativo da geometria (Figura 01).

Figura 01 – Modelo referência.



Legenda:

- A - Barra de apoio no pilar
- B - Barra de apoio no console
- D - Distância entre banzos
- U - Distância entre montantes
- H - Altura do arco
- L - Comprimento total

Fonte: Do Autor (2016)

2.2 DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE ESTUDO

Após o modelo referência, foi analisado quais os itens que influenciavam diretamente na otimização geométrica. Criou-se então três grupos de otimização com base nesses fatores, conforme elencados a baixo:

Grupo 1: relação entre altura do arco e comprimento da treliça (H/L);

Grupo 2: distância entre montantes (U);

Grupo 3: distância entre banzos (D).

Rebello (2000) propõe que o intervalo da relação H/L deve ficar entre 0,10 a 0,20 para que assim ocorra um consumo ideal, porém para este trabalho foi extrapolado os limites sendo utilizada a faixa de 0,075 a 0,300. Segundo Caetano (2015) relações à cima de 0,300 demonstraram deformações excessivas aumentando a seção do perfil para promover maior rigidez. A distância entre banzos (D) foi estabelecida entre 0,20 m à 0,65 m, valores menores que 0,20 m dificultariam a execução e maiores que 0,65 não apresentam redução significativa quanto ao consumo de material. A distância entre montantes (U) foi definido de 0,50 m à 1,00 m, treliças em que a distância entre montantes é pequena aumentam muito a quantidade de barras, porém não diminuem a dimensão dos perfis devido a flambagem. O carregamento foi distribuído linearmente sobre o banzo superior adotando um valor de projeto de 7,50 kN/m. Com esses parâmetros foi elaborado 21 modelos conforme consta na Tabela 1.

Tabela 01 – Primeira modelagem

	SIGLA	D (m)	U (m)	H/L (m/m)
REFERÊNCIA	REF	1,70	0,60	0,093
VARIAÇÃO DA RELAÇÃO H/L				
GRUPO I	HL01	1,70	0,60	0,075
	HL02	1,70	0,60	0,100
	HL03	1,70	0,60	0,125
	HL04	1,70	0,60	0,150
	HL05	1,70	0,60	0,200
	HL06	1,70	0,60	0,225
	HL07	1,70	0,60	0,250
	HL08	1,70	0,60	0,300
VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE MONTANTES				
GRUPO II	U01	1,70	0,50	0,093
	U02	1,70	0,75	0,093
	U03	1,70	1,00	0,093
VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE BANZOS				
GRUPO III	D01	0,20	0,60	0,093
	D02	0,25	0,60	0,093
	D03	0,30	0,60	0,093
	D04	0,35	0,60	0,093
	D05	0,40	0,60	0,093
	D06	0,45	0,60	0,093
	D07	0,50	0,60	0,093
	D08	0,55	0,60	0,093
	D09	0,60	0,60	0,093
	D10	0,65	0,60	0,093

Fonte: Do Autor (2016)

A partir destes modelos foi desenvolvido o cálculo do consumo de aço. Com os resultados analisou-se quais os fatores que mais influenciaram na redução do consumo de aço, assim a partir destes dados foram elaborados novos arranjos com o propósito de apresentar a otimização geométrica com maior economia para a tipologia Pratt.

2.3 ESPECIFICAÇÕES DO MATERIAL

As especificações do aço utilizado neste dimensionamento foram com base no item 4.5.2.9 da NBR 8800 (2008) onde o módulo de elasticidade (E) utilizado foi de

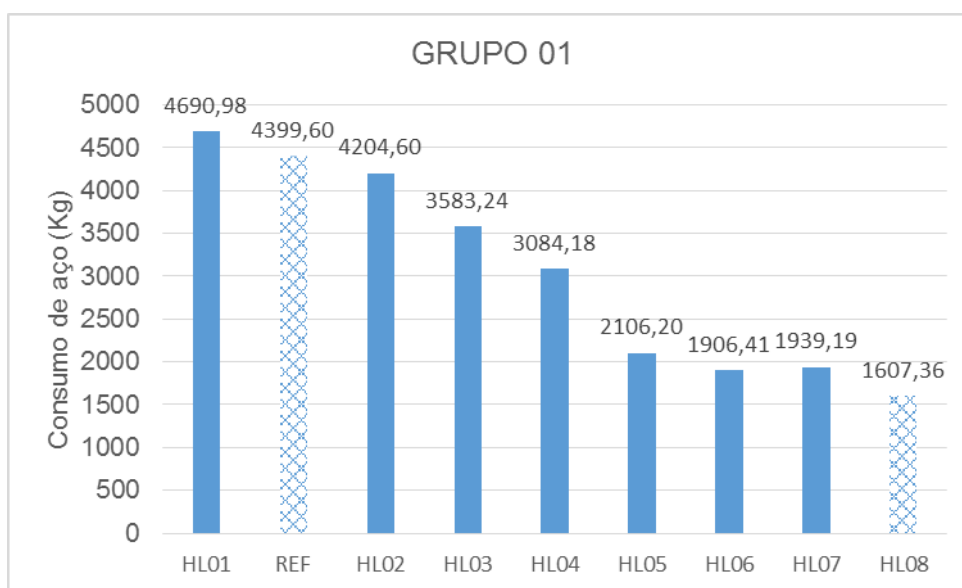
200.000 MPa, o coeficiente de Poisson (ν_a) 0,30, o coeficiente de dilatação térmica (β_a) de $1,20 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e a massa específica (ρ_a) de 7.850 kg/m^3 . Foi adotado aço MR 250 com tensão limite de 250 MPa e tensão última de 400 MPa e para os tirantes adotou-se o aço A572-Grau 65 com tensão limite de 450 MPa e última 550 MPa.

Utilizou-se o perfil “U” do banco de dados da AISC (*American Institute of Steel Construction*) versão 14.0. Para os cálculos foi adotado o *software* versão estudantil Autodesk Robot Analysis Structural 2014, seguindo a norma EUROCODE 3 (2005), item 6.2.3 para barras submetidas a tração, 6.3 para barras submetidas a compressão, 6.1 e 6.2 para verificação de flambagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o desenvolvimento dos cálculos foi possível concluir que a variação geométrica influencia diretamente no consumo de aço das estruturas planas em arco treliçadas, conforme Caetano (2015), Breuning (2008) e Azevedo (2002). O primeiro resultado como mostra no Gráfico 01 referiu-se ao Grupo 01 onde a variação se deu pela relação altura e comprimento da treliça, o modelo referência (REF) teve o segundo maior consumo de aço enquanto o modelo HL08 foi o que obteve o menor consumo de aço, com uma redução de 63,47% em relação ao REF.

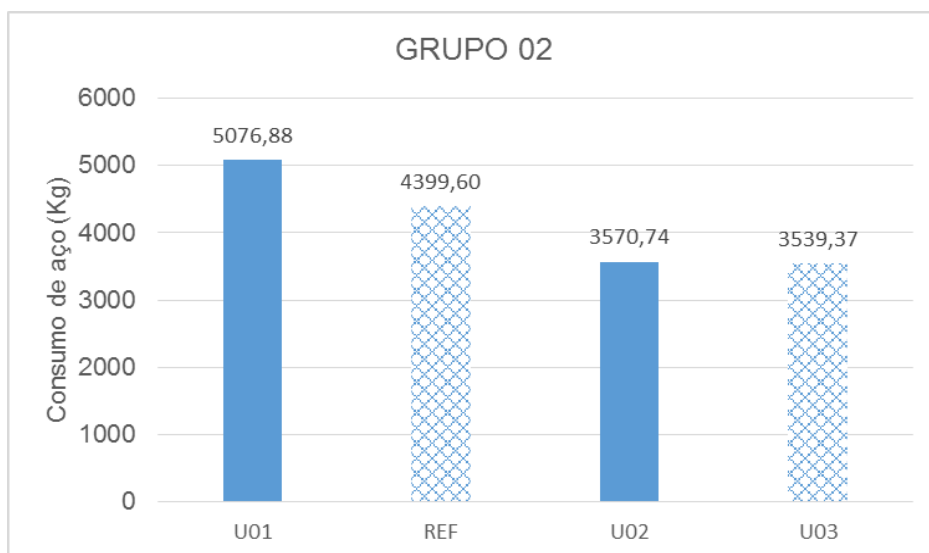
Gráfico 01 – Consumo de aço através da variação H/L



Fonte: Do Autor (2016)

O Grupo 02 considerou a variação da distância entre montantes, neste grupo foi possível averiguar com base no Gráfico 02 que a redução de aço do modelo REF comparada ao modelo mais econômico (U03) foi de menor proporção equiparado ao Grupo 01, obtendo uma redução de 19,55%.

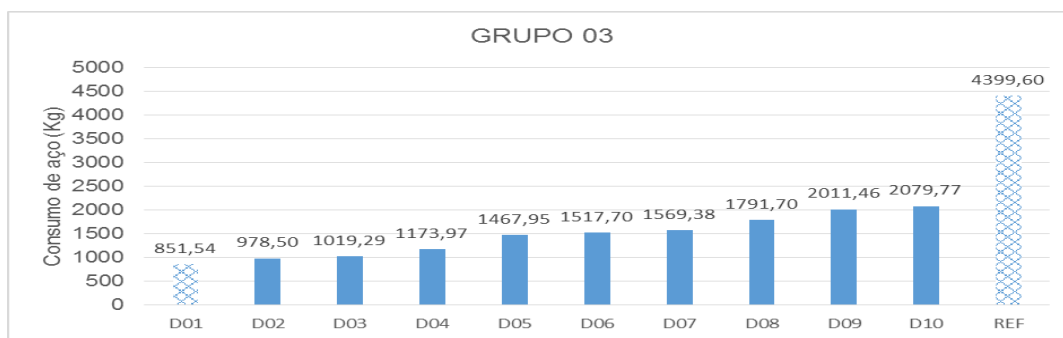
Gráfico 02 – Consumo de aço através da variação da distância entre montantes.



Fonte: Do Autor (2016)

Por fim no Gráfico 03 apresentou-se o consumo de aço do Grupo 03 que levou em consideração a variação da distância entre banzos. Das três variações geométricas esta foi a que apresentou a maior redução no consumo de aço, como ilustrado a baixo, o modelo REF obteve um consumo de 4399,60 Kg de aço, enquanto o modelo mais econômico deste grupo (D01) consome 851,54 Kg de aço reduzindo em 80,65% o consumo.

Gráfico 03 – Consumo de aço através da variação da distância entre banzos.



Fonte: Do Autor (2016)

Posteriormente realizou-se uma combinação entre os modelos econômicos de cada grupo, por conseguinte foram concebidos novos modelos com maior economia. Para tal fim foram selecionados do Grupo 01 três amostras que compreenderam os modelos HL06, HL07 e HL08, do Grupo 02 foram selecionadas duas amostras a U02 e U03 e no Grupo 03 assim como no primeiro foram selecionadas três amostras compreendendo os modelos D01, D02 e D03.

Com o total de 8 amostras elaborou-se 18 novos modelos conforme mostra a Tabela 02, nesta tabela consta quais os modelos que pertencem ao novo arranjo além de apresentar o consumo de aço.

Tabela 02 – Combinação dos modelos mais econômicos de cada grupo

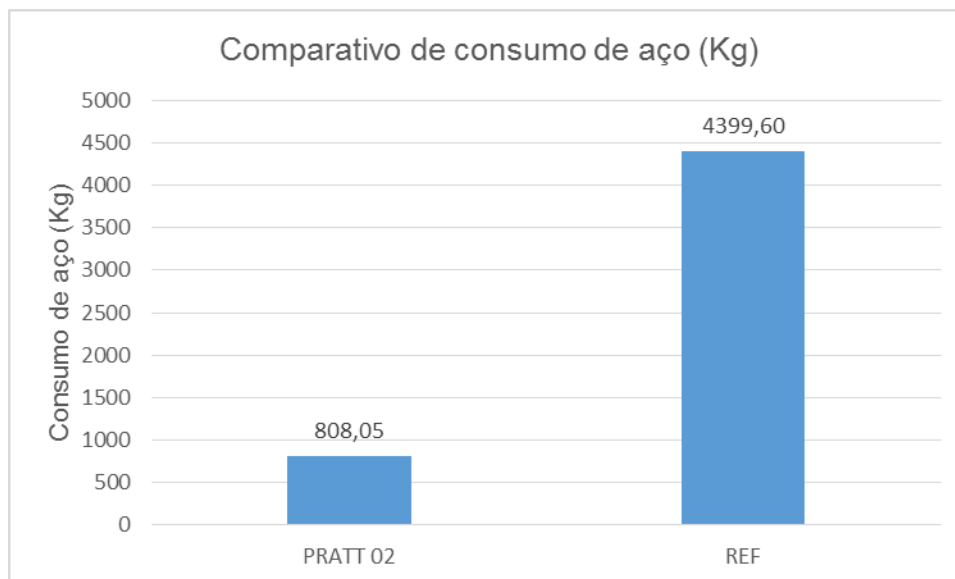
SIGLA	H/L (m/m)	U (m)	D (m)	Peso (Kg)
REF	0,093	0,60	1,70	4399,60
PRATT 01	0, 225 - HL 06	0,75 - U02	0,20 - D01	900,67
PRATT 02	0, 225 - HL 06	0,75 - U02	0,25 - D02	808,05
PRATT 03	0, 225 - HL 06	0,75 - U02	0,30 - D03	821,83
PRATT 04	0, 225 - HL 06	1,00 - U03	0,20 - D01	1091,86
PRATT 05	0, 225 - HL 06	1,00 - U03	0,25 - D02	999,75
PRATT 06	0, 225 - HL 06	1,00 - U03	0,30 - D03	1018,48
PRATT 07	0,250 - HL 07	0,75 - U02	0,20 - D01	1147,33
PRATT 08	0,250 - HL 07	0,75 - U02	0,25 - D02	1177,36
PRATT 09	0,250 - HL 07	0,75 - U02	0,30 - D03	1085,26
PRATT 10	0,250 - HL 07	1,00 - U03	0,20 - D01	1122,59
PRATT 11	0,250 - HL 07	1,00 - U03	0,25 - D02	1028,07
PRATT 12	0,250 - HL 07	1,00 - U03	0,30 - D03	936,44
PRATT 13	0,300 - HL 08	0,75 - U02	0,20 - D01	1476,42
PRATT 14	0,300 - HL 08	0,75 - U02	0,25 - D02	1248,79
PRATT 15	0,300 - HL 08	0,75 - U02	0,30 - D03	1146,07
PRATT 16	0,300 - HL 08	1,00 - U03	0,20 - D01	1437,45
PRATT 17	0,300 - HL 08	1,00 - U03	0,25 - D02	1207,89
PRATT 18	0,300 - HL 08	1,00 - U03	0,30 - D03	1232,43

Fonte: Do Autor (2016)

Estes modelos demonstraram consumos mais semelhantes onde a variação entre o menor e maior consumo, sem considerar o modelo REF ficou em 45,27%. O modelo destaque em redução de consumo de aço foi o PRATT 02, seu consumo ficou em 808,05 Kg de aço reduzindo quando comparado ao modelo REF em 81,63%, isto significa que o modelo PRATT 02 consome apenas 18,37% do total utilizado no modelo REF para sua fabricação.

Em sequência apresentam-se dois gráficos do comparativo de consumo de aço entre o modelo mais econômico e modelo referência. O Gráfico 04 apontou o consumo de aço em quilogramas.

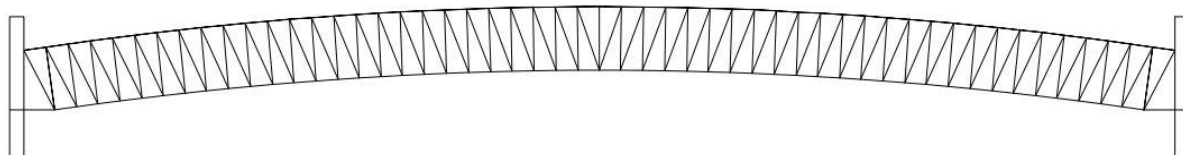
Gráfico 04 – Comparativo do consumo de aço em quilogramas



Fonte: Do Autor (2016)

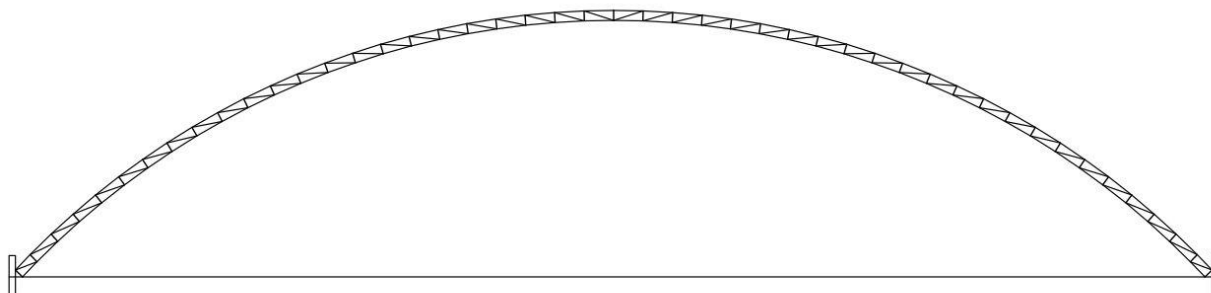
A diferença entre o modelo REF e PRATT 02 quanto ao consumo de aço foi consequência das configurações geométricas. A relação altura pelo comprimento foi um dos fatores fundamentais para a redução no consumo, neste item para maior economia o ideal é que a forma do arco se aproxime a de uma semi-esfera sendo impedido apenas quando ocorrer flambagem ou grandes alturas de arco que dificulta a confecção do platibanda. Para a visualização das diferenças geométricas segue o desenho do modelo REF e PRATT 02 na Figura 02 e Figura 03 respectivamente.

Figura 02 – Treliza referência (REF)



Fonte: Do Autor (2016)

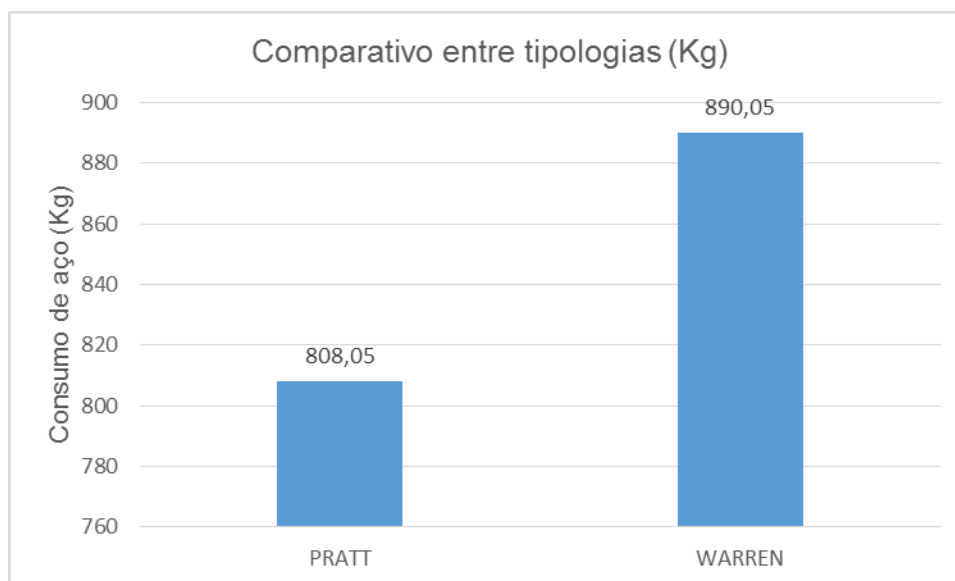
Figura 03 – Treliza PRATT 02



Fonte: Do Autor (2016)

Em 2015, Caetano apresentou um estudo sobre a redução de aço para a tipologia Warren utilizando considerações similares as deste estudo. Deste modo os gráficos a seguir expuseram um comparativo entre os modelos mais econômico da tipologia Warren e Pratt. O Gráfico 05 apresenta o consumo de aço em quilogramas, evidenciando assim que o consumo da tipologia Pratt foi a mais econômica sendo de 808,05 Kg contra 890,05 Kg da tipologia Warren.

Gráfico 05 – Comparativo do consumo de aço em quilogramas entre tipologia Pratt e Warren



Fonte: Do Autor (2016)

Fazendo o comparativo do consumo de aço em porcentagem considerando a tipologia Warren, a qual obteve o maior consumo como 100%. Para fabricar um modelo que suporte as mesmas condições porém com a tipologia Pratt é necessário apenas 90,79% do consumo de aço utilizado na outra tipologia.

Em seu estudo, Caetano (2015) apontou a importância em comparar a quantidade de nós, barras e flecha, considerando estes fatores importantes para a funcionalidade do sistema no momento de fabricação e execução. A Tabela 03 apresentou um comparativo entre estes itens.

Tabela 03 – Comparativo de nós, barras e flecha entre tipologias

	Nós (nº)	Barras (nº)	Flecha (mm)
PRATT 02	94	185	43,00
WARREN	109	216	62,86

Fonte: Do Autor (2016)

Novamente comprovou que a treliça Pratt é mais eficiente, pois além de obter maior redução no consumo de aço também possui vantagem quanto a quantidade de barras, nós e deformação.

4 CONCLUSÕES

Deveras vezes em estudos realizados sobre a construção de estruturas em aço são apontados fatores que atestam a importância da otimização para a realização de projetos mais econômicos, atendendo aos mesmos requisitos. Novamente por meio deste estudo comprovou-se a importância da otimização. Comparando o modelo referência ao modelo mais econômico obteve-se uma economia de 81,65%.

A variação H/L proposta por Rebello (2000) foi de 0,100 a 0,200, segundo Caetano (2015) valores à cima de 0,250 apesar de reduzirem esforços internos não compensam pelo aumento do tamanho das barras e da seção do perfil para proporcionar maior rigidez em combate a flambagem. Coerente com os estudos, a relação ideal para esta tipologia foi de 0,225 extrapolando o intervalo proposto por Rebello (2000), contudo ficando à baixo do limite proposto por Caetano (2015).

Distância entre montantes foi o item com menor variação do consumo de aço, através dos estudos fixou a distância de 0,75 m, próxima a distância sugerida no modelo de referência de 0,60 m.

O terceiro item analisado foi a distância entre banzos, Rebello (2000) afirma que com a diminuição da distância entre banzos não há aumentos significativos das forças axiais nas barras, ou seja, mesmo que fosse necessário utilizar outro perfil para atender a força axial em cada modelo, distâncias próximas utilizarão perfis iguais ou com poucas variações quanto ao consumo de aço. Exemplificou-se isto no Gráfico 3, a análise apontou que o consumo obteve crescimento com pequenas variações de um modelo para o outro.

Confrontando o modelo com maior economia na tipologia Pratt com o proposto por Rebello (2000) como o mais econômico para a tipologia Warren demonstrou-se que o modelo PRATT 02 também foi o mais econômico pois obteve redução de 9,21% em consumo de aço, além de ter redução quanto ao número de nós, barras e flecha contribuindo assim com maior facilidade no momento de montagem da estrutura.

5 PROPOSTAS PARA FUTURAS PESQUISAS

- Manutenção da altura pelo comprimento como fator de fabricação local determinante na região analisando a alteração no consumo.
- Comparar a influência na fundação do modelo referência e PRATT 02.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **“Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”** - NBR 8800, Rio de Janeiro, 2008.

AZEVEDO, Álvaro F. M.; FONSECA, Antonio Adão da; OLIVEIRA, Rui. **Optimização da Forma de uma ponte metálica**. España: Métodos Numéricos em Ingeniería, 2002. p. 02.

BARBOSA, C.O. B.; CUNHA, R. E. V. DA. **Dimensionamento de treliças metálicas usuais padronizadas, com auxílio de uma ferramenta computacional e cálculos manuais**. 2013. 85p. Dissertação (Graduação) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade da Amazônia, Belém, PA, 2013. p. 16.

BREUNIG, M. N. **Análise do desempenho das diferentes topologias de estruturas treliçadas utilizadas em coberturas de pavilhões industriais**. 2008. 143p. Dissertação (Graduação) - Universidade Regional Do Noroeste Do Estado Do Rio Grande Do Sul - Departamento De Tecnologia - Curso de Engenharia Civil, Ijuí, 2008.

CAETANO, Rafael P. **Otimização Geométrica Aplicada a estruturas articuladas em aço para treliça em arco submetida a carregamento vertical uniforme**. 2016. 15p. Dissertação (Graduação) – Curso de Engenharia Civil da Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, 2016. p. 05

EUROCODE 3. **Design of steel structures**. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2005.

NOGUEIRA, G. S. **Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio**. 2009. 179p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. p. 02

PEREIRA, J. P. G. **Heurísticas computacionais aplicadas à otimização estrutural de treliças bidimensionais**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Diretoria de Pesquisa e Pós Graduação, Centro Federal de Educação e Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SUSSEKIND, Carlos. **Curso de análise estrutural**. 5 ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1983. 3 v. p.191